

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

Effetti del cambiamento climatico sulla dinamica evolutiva delle malerbe

This is the author's manuscript

Original Citation:

Availability:

This version is available <http://hdl.handle.net/2318/152758> since

Publisher:

SIRFI

Terms of use:

Open Access

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available under a Creative Commons license can be used according to the terms and conditions of said license. Use of all other works requires consent of the right holder (author or publisher) if not exempted from copyright protection by the applicable law.

(Article begins on next page)

EFFETTI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO SULLA DINAMICA EVOLUTIVA DELLE MALERBE

VIDOTTO F.¹, MASIN R.², PANNACCI E.³, MARIANI L.⁴

1. Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari - Università di Torino

2. Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse Naturali e Ambiente – Università di Padova

3. Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali - Università degli Studi di Perugia

*4. Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali - Produzione, Territorio, Agroenergia – Università di Milano
E-mail: francesco.vidotto@unito.it*

Riassunto

Negli ultimi 150 anni circa, la Terra è entrata in una fase di riscaldamento globale, che ha portato ad un aumento della temperatura globale di circa 0.7 °C. Parallelamente si sta registrando un aumento della CO₂ nell'atmosfera. Il riscaldamento globale è stato anche accompagnato da variazioni nella frequenza e distribuzione delle precipitazioni. In questa sede si partirà dall'ipotesi che tali fenomeni debbano perdurare nei prossimi decenni, sebbene le previsioni sui valori futuri delle variabili climatiche siano affette da un sensibile livello d'incertezza. I cambiamenti climatici possono modificare vari aspetti legati alle infestanti, quali l'areale di distribuzione, la produzione di biomassa e la sua allocazione fra i diversi organi, le dinamiche della banca semi e dell'emergenza, la lunghezza del ciclo vitale, la capacità competitiva, il carattere di invasività, l'efficacia delle tecniche di gestione e dell'impiego degli erbicidi in particolare. Appare necessario aumentare le conoscenze sulla biologia ed ecologia delle malerbe nel contesto dei cambiamenti climatici per modificare in modo efficace le attuali strategie di gestione.

Parole chiave

Cambiamenti climatici; Riscaldamento Globale; Biologia delle Malerbe.

Summary

Effects of climate change on weed dynamics

Recent history of Earth indicates that average temperature has risen by about 0.7 °C in the last 150 years. Meanwhile, atmospheric CO₂ concentration has also increased and rainfall distribution has changed in several areas. Climatic change may have a dramatic impact on weeds in terms of population dynamics and interactions crop-weed. Traits that may be affected by climate change in weeds include distributions, biomass production and allocation, seed bank and emergence dynamics, cycle length, competitiveness, invasiveness, management efficacy (in particular use of herbicides). In order to develop the most appropriate weed management programs for future scenario, climate change sets as mandatory a better knowledge of biology and ecology of weeds.

Keywords

Climate Change, Global Warming, Weed management.

Cambiamento climatico e relative cause

Per un certo luogo o territorio si definisce cambiamento climatico ogni variazione significativa negli indici statistici (di tendenza centrale e/o di variabilità) caratteristici di una o più variabili meteorologiche (temperatura, umidità, precipitazione, vento, radiazione, ecc.). La paleoclimatologia mostra con evidenza che la tendenza al cambiamento è uno dei tratti più caratteristici del clima del nostro pianeta fin dalle sue origini (Wainer et al., 2013). Limitandoci agli ultimi 1000 anni, dopo la fase calda dell'optimum climatico medioevale e la fase fredda della piccola era glaciale, dal 1850 circa siamo entrati in una fase di "riscaldamento globale" (o *global warming* – GW) che a livello globale ha fin qui prodotto un aumento complessivo di 0.7 °C e che ha visto tre fasi di aumento delle temperature (1850-1880, 1920-1945 e 1977-1998) alternarsi a tre fasi di relativa stabilità, fra cui quella in atto, apertasi nel 1999 (Figura 1).

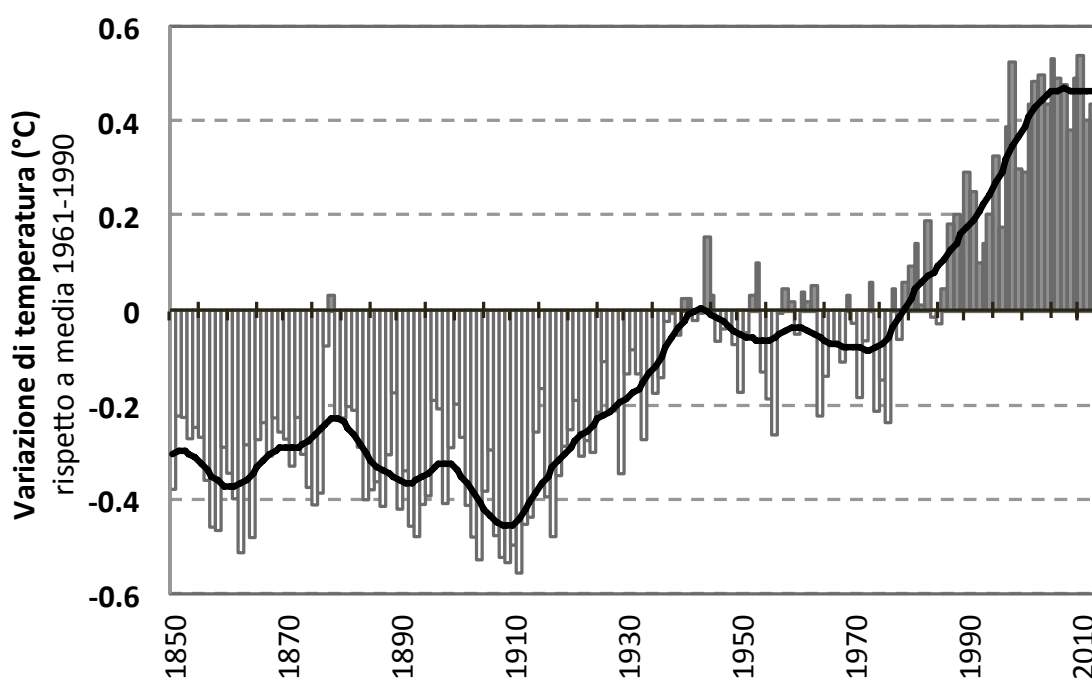


Figura 1. Andamento delle temperature globali dal 1850 al 2012 (<http://www.cru.uea.ac.uk/>). In complesso le temperature globali sono aumentate di circa 0.7 °C. Si notino anche le tre fasi di incremento (1850÷1880, 1910÷1945 e 1977÷1998) alternate a fasi di stazionarietà o lieve diminuzione (1881÷1909, 1946÷1976 e da 1999 ad oggi).

Se poi miriamo la nostra attenzione al clima europeo degli ultimi 50 anni, l'elemento saliente appare costituito dal cambiamento climatico brusco (Mariani et al., 2012) che ha interessato l'areale euro-mediterraneo alla fine anni '80 del XX secolo e che ha portato le temperature ad aumentare in media di 1 °C (Figura 2).

Nello specifico, le caratteristiche più salienti del clima dell'Europa occidentale a valle del 1987 e rispetto a quello del periodo precedente sono le seguenti (Maggiore e Mariani, 2013):

- a nord del 48° parallelo: la temperatura media annua aumenta di 0.5 °C, la precipitazione aumenta, la radiazione solare globale cala, l'evapotraspirazione da coltura di riferimento è stazionaria e l'aridità cala;
- a sud del 48° parallelo: la temperatura media annua aumenta di 1.5 °C, la precipitazione cala (seppur con molte eccezioni), aumentano radiazione solare globale, evapotraspirazione da coltura di riferimento e aridità.

Per l'Europa meridionale, Italia inclusa, il cambiamento climatico del 1987 si è tradotto in una maggior frequenza dei periodi di siccità e delle ondate di calore (European Commission, 2007; Miraglia et al., 2009; Lovelli et al., 2012)

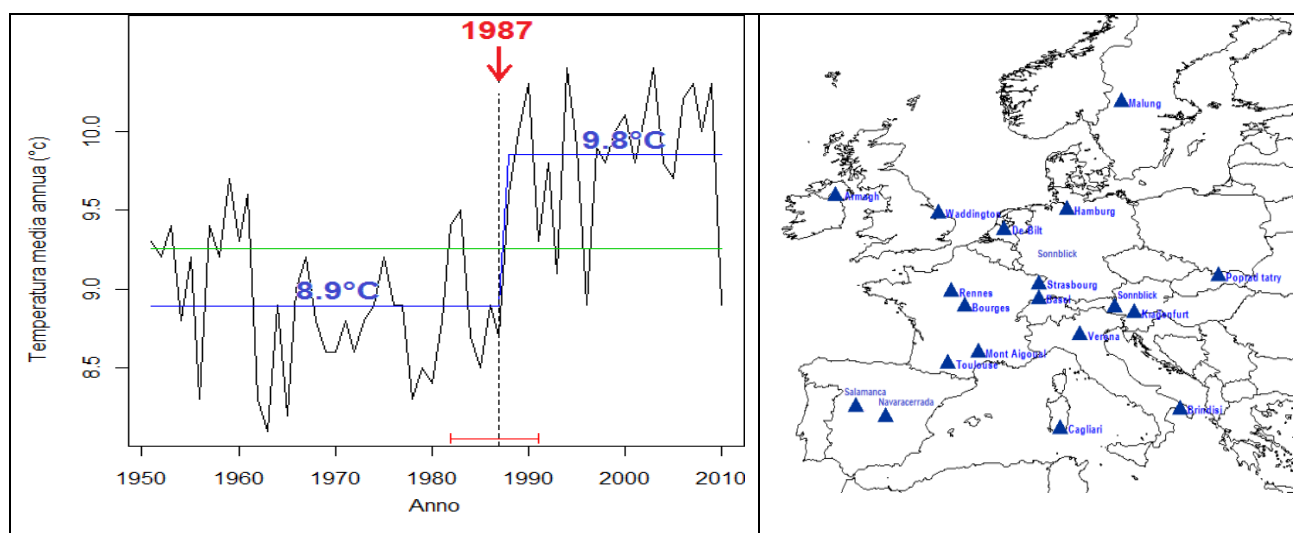


Figura 2. Diagramma delle temperature medie annue di 19 stazioni europee per il periodo 1951-2010 (dati disponibili: 98.4%). Con il 99% di probabilità la discontinuità ricade fra 1982 e 1991. Anno più probabile di discontinuità = 1987 (media 1951-1987= 10.1 °C; media 1988-2009= 11.0 °C). Analisi di discontinuità eseguita con la libreria statistica *strucchange* – R Cran.

Alle radici di tali fenomeni sta la brusca riconfigurazione della circolazione generale che ha portato ad una modifica della frequenza e persistenza dei diversi tipi di tempo (anticlioni, saccature atlantiche, depressioni isolate, ecc.) che interessano l'area euro-mediterranea. A tale riguardo un elemento chiave è il fatto che l'area a dominio anticiclonico nel corso della stagione vegetativa (marzo-agosto) si è portata più a nord rispetto alla posizione media del periodo precedente al 1987, passando ad esempio dalla pianura padana alla Germania centrale (600 km più a nord) (Figura 3).

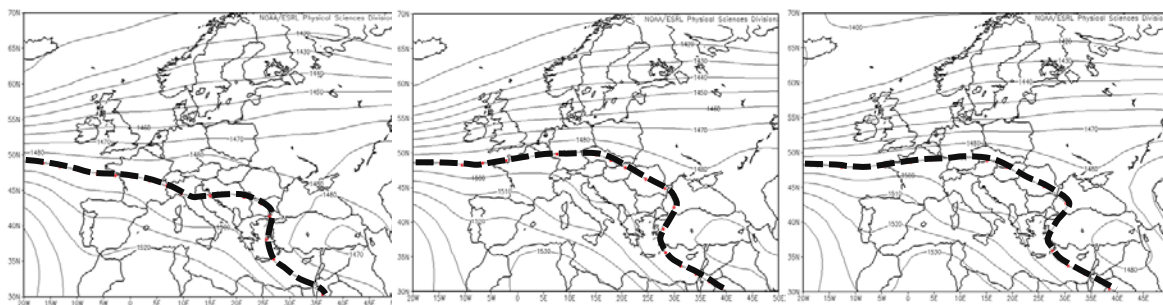


Figura 3. Limite medio dell'area a dominio anticiclonico (indicato dall'isoipsa di 1490 m per il livello barico di 850 hPa linea puntinata) per il periodo marzo - agosto e per i periodi, da sinistra a destra, 1968-87, 1988-2003 e 2004-2011 (nostre elaborazioni su dati NOAA – NCEP). Si noti che il limite dell'anticiclone, sull'Appennino Tosco Emiliano nel 1968-87, si sposta sulla Francia del Nord nei due periodi successivi. Si noti anche che la sua posizione non cambia significativamente nel periodo 2004-2011 rispetto al 1988-2003, il che attesta la sostanziale stazionarietà della nuova fase climatica a valle del cambiamento climatico del 1987.

Circa le cause del *global warming* la comunità scientifica ha fin qui avanzato due principali teorie. La prima teoria, maggioritaria, è la teoria dell'*Anthropogenic Global Warming* (teoria AGW) e sostiene che la causa del GW sia l'aumento della concentrazione di CO₂ atmosferica prodotta dalle attività umane mentre la seconda (teoria solare) chiama invece in causa l'accresciuta attività della nostra stella registratasi nel corso del XX secolo.

Entrambe le teorie hanno come sostanziale elemento di debolezza il fatto che il fattore da esse posto all'origine del riscaldamento globale (CO₂ per la prima ed attività solare per la seconda) sono di per sé troppo deboli per giustificare un aumento importante delle temperature del pianeta. Ad esempio, in base alle leggi fondamentali della fisica, il passaggio della CO₂ atmosferica dai livelli pre-industriali (280 ppmv) a quelli che al persistere dei tassi di incremento attuali sono attesi per il 2100 (560 ppmv) produrrebbe un incremento di circa 1 °C (Mariani, 2012a).

Pertanto entrambe le teorie si sono viste costrette a cercare fattori di amplificazione e più nello specifico la teoria AGW ha individuato come amplificatore primario degli effetti della CO₂ atmosferica il feed-back positivo da vapore acqueo e nubi (di gran lunga i principali artefici dell'effetto serra terrestre, essendo accreditati del 75% dell'effetto complessivo, contro il 20% di CO₂) (Lacis et al., 2010; IPCC, 2007; IPCC, 2013) mentre la teoria solare ha individuato negli effetti planetari (Scafetta, 2012) ovvero nei raggi cosmici galattici (Kirkby et al., 2011) gli amplificatori dell'effetto della accresciuta attività solare. La disamina di tali argomenti esula dagli scopi di questa trattazione e si rinviando pertanto gli interessati a scritti specifici.

Effetti dell'aumento della concentrazione di CO₂

La concentrazione media di CO₂ nell'atmosfera terrestre è passata da 280 ppmv nell'epoca pre-industriale (fine del XVIII secolo) a 395 ppmv nel 2013, secondo i dati dell'Osservatorio di Mauna Loa nelle Hawaii, che presenta un ottimo livello di rappresentatività globale (l'intera serie dei dati è

reperibile presso ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_mm_mlo.txt). Nel periodo compreso fra il 2002 e il 2011, è stato stimato che l'emissione di CO₂ da attività umane sia cresciuta del 54% rispetto ai valori del 1990 (IPCC, 2013). Con gli attuali tassi di incremento (+1.95 ppmv/anno nel periodo 1996-2013 per Mauna Loa), la concentrazione di CO₂ è destinata a raggiungere 467 ppmv nel 2050 e 565 ppmv nel 2100.

Attraverso il processo fotosintetico, le piante utilizzano la CO₂ atmosferica come fonte di carbonio per la produzione di composti organici. Si ritiene che se si riportasse la CO₂ atmosferica dai livelli attuali a quelli del 1750 (280 ppmv) le principali colture manifesterebbero cali di resa compresi fra il 25 ed il 40% (Araus et al., 2003). Il lungo processo evolutivo che ha portato ai meccanismi fisiologici e alle strutture anatomiche attualmente diffusi nel regno vegetale sembra essere strettamente correlato ai principali cambiamenti climatici avvenuti durante la storia geologica terrestre. Si ritiene, ad esempio, che la notevole riduzione di CO₂ avvenuta circa 350 milioni di anni fa in coincidenza con la grande glaciazione carbonifera (Mariani, 2012b) sia la principale responsabile della comparsa delle foglie, fenomeno che ha richiesto circa 40-50 milioni di anni per completarsi (Beerling et al., 2001; Ceccarelli et al., 2010).

I bassi livelli atmosferici di CO₂ (circa 180 ppmv) che si sono registrati in coincidenza con le 15 grandi glaciazioni che hanno periodicamente colpito la Terra negli ultimi 2 milioni di anni (Mariani, 2012b), sembrano essere anche alla base della comparsa del *pathway* fotosintetico C₄, che rispetto al meccanismo C₃ comporta un vantaggio legato a sistemi di concentrazione che determinano una maggiore efficienza dell'utilizzo del carbonio atmosferico, vantaggio che tuttavia è destinato a ridursi man mano che la CO₂ atmosferica aumenta (Ehleringer e Monson, 1993; Benvenuti, 2011). Le differenze fisiologiche fra le specie C₃ e C₄ si riflettono in un diverso comportamento ecologico, almeno in termini di produzione di biomassa totale, che vede favorito uno o l'altro dei due gruppi, a seconda delle condizioni pedo-climatiche. In base a questo criterio, l'incremento della CO₂ atmosferica costituisce una pressione selettiva favorevole alle specie C₃, mentre le C₄ sarebbero favorite dall'aumento della temperatura (Ziska, 2000; Hyvönen, 2008), sebbene in letteratura siano riportati casi discordanti (Williams et al., 2007). Poiché i due fenomeni (aumento di CO₂ e di temperatura) si stanno spesso manifestando in contemporanea, è difficile prevedere quale gruppo di specie trarrà maggiore vantaggio dai cambiamenti climatici, in particolare nel caso delle malerbe (Olesen e Bindi, 2002). Gli effetti dell'aumento di CO₂ sulla vegetazione infestante sono inoltre indirettamente modificati dalla competizione con la coltura, la quale può a sua volta risultare più o meno competitiva in conseguenza della maggiore disponibilità di CO₂. In studi condotti in atmosfera arricchita di CO₂ nei quali soia (una specie C₃) è stata posta in competizione con *Chenopodium album* (specie C₃) o con *Amaranthus retroflexus* (specie C₄), è stato rilevato,

rispettivamente, un aumento delle perdite produttive (dal 28 al 39%) o una riduzione (dal 45 a 30%) delle medesime (Ziska, 2000). Nella soia è stato inoltre osservato un aumento del numero di baccelli prodotti a concentrazioni più elevate di CO₂ (Ziska, 2013b). Analoghi studi condotti utilizzando come coltura il sorgo (una specie C₄), hanno evidenziato un aumento significativo delle perdite di produzione nel caso di competizione, sia con specie C₃, sia con specie C₄ (Ziska, 2003b; Figura 4).

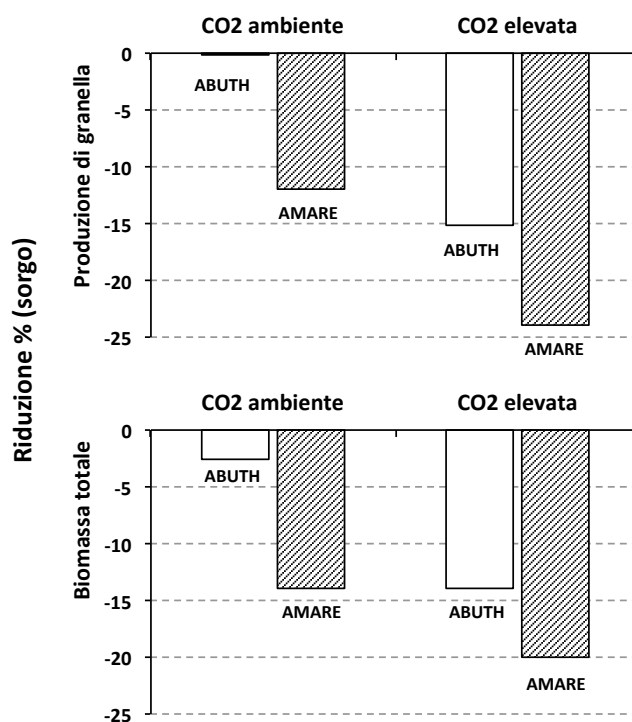


Figura 4. Riduzione percentuale di produzione di granella (grafico in alto) e di biomassa totale in sorgo cresciuto in competizione con *Abutilon theophrasti* o con *Amaranthus retroflexus*, in concentrazioni di CO₂ ambientali e in atmosfera arricchita (+250 mol/mol) di CO₂ (da Ziska, 2003b).

L'aumento di concentrazione di CO₂ sembrerebbe quindi determinare una riduzione delle perdite produttive solamente nelle associazioni coltura C₃-infestante C₄, mentre è prevedibile un aumento delle perdite di produzione in tutti gli altri casi. Questa valutazione deve tuttavia tenere conto del fatto che le infestazioni sono per lo più costituite da associazioni di specie diverse con diverso *pathway* fotosintetico e che pertanto la previsione della possibile evoluzione nelle diverse colture agrarie e nei diversi ambienti in funzione dei cambiamenti di concentrazione di CO₂ è affetta da un ampio margine di incertezza. Basti pensare, ad esempio, che tra le cinque specie infestanti del mais presenti nella realtà italiana e diffuse con una frequenza di almeno il 50%, tre sono C₃ (*C. album*, *Solanum nigrum* e *Polygonum persicaria*) e due sono C₄ (*Echinochloa crus-galli* e *A. retroflexus*) (Ferrero e Vidotto, 2006; Vidotto et al., 2013). L'interazione con altri fattori ambientali può inoltre modificare la risposta complessiva del sistema coltura/infestante. In questo senso, un peso

importante riveste la disponibilità idrica. In caso di disponibilità sub-ottimale, ad esempio, studi condotti su pomodoro (una specie C₃) hanno evidenziato un aumento delle perdite produttive dovute alla competizione con *A. retroflexus* (Valerio et al., 2011).

Altri effetti diretti dell'incremento della concentrazione della CO₂ atmosferica sono rappresentati da una riduzione della traspirazione, dovuta a minore densità stomatica e apertura stomatica media, e da un minor tasso di respirazione (Drake et al., 1997; Olesen e Bindi, 2002).

Oltre agli effetti sulla biomassa totale prodotta, alcune specie rispondono alle variazioni di concentrazione di CO₂ atmosferica con una diversa allocazione della biomassa. In atmosfera arricchita di CO₂, *Cirsium arvense* ha manifestato un aumento del rapporto fra biomassa radicale e biomassa epigeica, mostrando inoltre una minore sensibilità all'applicazione di glifosate, probabilmente a causa dell'effetto "diluizione" determinato dalle maggiori dimensioni degli organi di riserva (Ziska et al., 2004b). Più in generale, alcuni autori ritengono che con l'aumento della CO₂ atmosferica saranno favorite le specie dotate di organi sotterranei di moltiplicazione (Mahajan et al., 2012). Una diversa allocazione della biomassa potrebbe inoltre aumentare il rapporto C:N negli organi interessati, con possibili ripercussioni sull'impatto di possibili organismi limitatori, insetti fitofagi in particolare (Kriticos et al., 2011).

Variazioni possono riguardare anche la fenologia e la produzione di strutture legate alla riproduzione. Una delle specie maggiormente studiate in questo senso è *Ambrosia artemisiifolia*. L'interesse verso questa asteracea è probabilmente dovuto alla particolare caratteristica di costituire una minaccia sia sul piano sanitario (produzione di polline allergenico), sia come infestante delle colture agrarie. In condizioni di concentrazione di CO₂ simili a quelle previste per la fine del XXI secolo, *A. artemisiifolia* produce una quantità di biomassa totale e di polline superiori a quella prodotta nelle attuali condizioni di concentrazione di CO₂, ma solo per le coorti sviluppatesi a metà o verso la fine della stagione di crescita (Rogers et al., 2006). Tale comportamento potrebbe aggravare la pericolosità di questa specie, in quanto aumenterebbe ulteriormente la persistenza del polline nell'atmosfera, allungando il periodo di disagio per le persone sensibili e aumentando il rischio di sensibilizzazione nella popolazione non sensibile. La maggiore concentrazione di CO₂ nelle aree urbane, associata all'effetto di "isola di calore" tipico degli insediamenti urbani, potrebbe acuire ulteriormente il problema proprio nelle zone in cui è più elevata la densità della popolazione esposta (Ziska et al., 2003a; Ziska et al., 2004a).

Effetti dell'aumento della temperatura

L'aumento della temperatura media può avere delle pesanti ripercussioni sulle dinamiche delle infestazioni. Gli aspetti che vengono influenzati da questo fenomeno sono molteplici e riguardano,

tra i più importanti, l'areale di distribuzione delle singole specie (Hyvönen, 2008; Wilson et al., 2009; Clements e DiTommaso, 2011; Juroszek e von Tiedemann, 2013), la lunghezza complessiva del ciclo vitale e la durata relativa delle fasi vegetativa e riproduttiva (Benvenuti, 2011; Ziska e Beggs, 2012), la sincronizzazione tra fotoperiodo e termoperiodo ed i rapporti con organismi mutualistici (prevalentemente insetti) coinvolti nei fenomeni riproduttivi (Benvenuti, 2011), le dinamiche della banca semi (Hoyle et al., 2013) e l'efficacia delle tecniche di gestione, inclusa la persistenza degli erbicidi (Bailey, 2004).

Una tendenza generale conseguente al riscaldamento globale è lo spostamento verso i poli delle aree di distribuzione di vari organismi, comprese le specie vegetali infestanti, grazie alla creazione di nuove nicchie con caratteristiche climatiche compatibili con i cardinali termici di germinazione e crescita delle diverse specie. Clements e DiTommaso (2011) riportano uno spostamento verso i poli di circa 6 km/anno dell'areale di distribuzione di 1700 organismi. Previsioni basate su proiezioni climatiche fornite da vari modelli *Atmosphere-Ocean Global Circulation Model* (AOGCM) e su monitoraggi malerbologici riportano, ad esempio, uno spostamento verso nord dell'areale di distribuzione di *Sorghum halepense* negli USA variabile da 200 a 600 km entro il 2100 (McDonald et al., 2009).

Lo spostamento a nord non comporta necessariamente una effettiva espansione dell'areale di distribuzione di una determinata specie, in quanto è prevedibile una riduzione della presenza della stessa specie nelle regioni già precedentemente incluse nell'areale e che diverranno troppo calde. Un fenomeno di questo genere è previsto, ad esempio per *Lantana camara* in Australia (Taylor et al., 2012b) e per *Ranunculus acris* ssp. *acris* a livello mondiale (Bourdôt et al., 2013). Gli effetti dell'aumento della temperatura sulle aree di distribuzione possono assumere dinamiche significativamente diverse fra specie presenti negli ambienti naturali e specie infestanti le colture agrarie. Le condizioni ambientali determinate dalla pratica agricola, ed in particolare le diverse condizioni di umidità del suolo legate alle lavorazioni, alla successione colturale e, soprattutto, alle irrigazioni, possono risultare particolarmente favorevoli anche in zone dove l'ambiente naturale non consentirebbe l'affermazione di una certa specie. Un esempio è costituito da *A. theophrasti*, specie che è in grado di diffondersi come infestante in regioni a clima mediterraneo grazie al ricorso all'irrigazione (Holt e Boose, 2000). L'espansione verso degli areali di distribuzione delle infestanti segue, di fatto, il graduale spostamento verso i poli delle aree coltivate, conseguenza anch'esso dell'aumento globale della temperatura.

L'aumento della temperatura determina anche lo spostamento altitudinale della distribuzione delle specie, con un incremento della ricchezza specifica alle quote maggiori (Satrapová et al., 2013; Chown et al., 2013). Nello specifico si stima che il succitato aumento di 1.5 °C delle temperature

medie dell'Europa a sud del 48° parallelo determinato dal cambiamento climatico del 1987 darà luogo a regime ad un innalzamento in quota di 250-300 m degli areali delle specie spontanee e coltivate. Tuttavia, come nel caso dello spostamento in senso latitudinale, l'aumento delle specie infestanti sembra essere correlato con la variazione della tipologia e dell'intensità delle attività umane con la creazione di nuove nicchie ecologiche, sfruttate in particolare dalle specie esotiche (Marini et al., 2012; Tabella 1, Figura 5). Al riguardo non può essere trascurata la sensibile espansione degli areali a bosco ai danni delle aree a prevalente vegetazione erbacea (prati, pascoli, ecc.) che in Italia è in atto da quasi un secolo in ambito alpino ed appenninico (Conti e Fagarazzi, 2005).

Tabella 1. Analisi della relazione fra ricchezza specifica densità abitativa e temperatura (in termini lineari e quadratici), diversità degli habitat e presenza di calcare, suddivisa fra specie native ed esotiche. In tabella sono riportati i coefficienti di regressione standardizzati (β) e i valori di probabilità associati. L'analisi si riferisce all'insieme del gradiente altitudinale delle province di Bergamo e Brescia (da Marini et al., 2012).

Variabile esplicativa	Native		Esotiche	
	β	P	β	P
densità abitativa (lineare)	0.147	0.054	-0.041	0.867
densità abitativa (quadratico)	–	–	0.594	0.007
temperatura (lineare)	0.189	< 0.001	0.018	0.910
temperatura (quadratico)	-0.484	0.025	0.411	0.003
diversità degli habitat (lineare)	0.495	< 0.001	–	–
presenza di calcare (lineare)	0.284	< 0.001	–	–

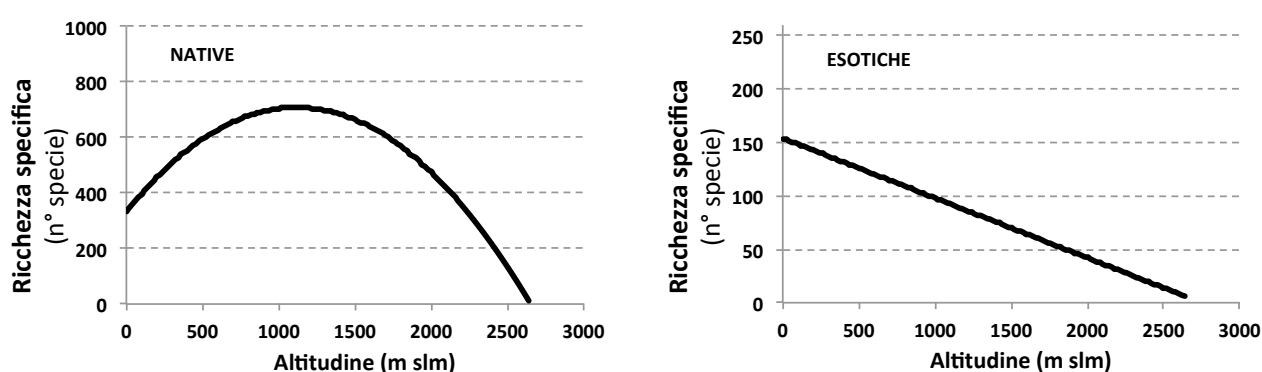


Figura 5. Relazione fra altitudine e ricchezza specifica di specie native ed esotiche nelle province di Bergamo e Brescia (da Marini et al., 2012).

Recenti studi hanno evidenziato come l'effettiva capacità delle malerbe di adattarsi ai cambiamenti climatici, e all'aumento di temperatura in particolare, sia da attribuire non solo alla loro diffusa plasticità fenotipica, ma anche al loro potenziale evolutivo. Le piante infestanti, e soprattutto quelle

con comportamento invasivo collocate nei margini più a nord del loro areale di diffusione, sono in grado di adattarsi alle temperature più basse e alla durata più breve del ciclo vegetativo, grazie a una serie di elementi adattativi, quali ad esempio una maggiore precocità, la produzione di foglie e semi di maggiori dimensioni (Clements e DiTommaso, 2011). In questo senso, previsioni sulla futura espansione delle infestanti risultano piuttosto complesse e incerte, in quanto non dovrebbero considerare esclusivamente le attuali esigenze ambientali medie, ma dovrebbero includere anche i fattori evolutivi e i processi di adattamento (Juroszek e von Tiedemann, 2013). In questo senso, specie diverse possono rispondere all'evoluzione climatica in modo differenziato, a seconda delle principali caratteristiche legate al potenziale di diffusione (Tabella 2).

Tabella 2. Importanza relativa delle principali caratteristiche di invasività di alcune specie, ai fini di una loro possibile adattamento evolutivo a seguito di cambiamenti climatici (da Clements e DiTommaso, 2012).

Caratteristica	Importanza relativa della caratteristica			
	<i>Impatiens glandulifera</i>	<i>Abutilon theophrasti</i>	<i>Fallopia japonica</i>	<i>Sorghum halepense</i>
Elevato tasso di crescita	++	+	++	+
Ampia tolleranza climatica o ambientale	++	++	++	++
Brevità del ciclo	+	+	+	+
Elevata capacità riproduttiva	++	++	++	+
Capacità di modificare le dimensioni del seme	++	++	+	+
Dispersione efficace	++	–	++	+
Capacità di moltiplicazione agamica e/o riproduzione uniparentale	–	+	+ / –	+
Assenza di fabbisogni particolari per la germinazione	+	–	+ / –	–
Elevata capacità competitiva	+	++	++	++
Difese efficaci contro i nemici naturali	?	+	?	?

In termini competitivi, variazioni di temperatura anche limitate possono avere delle ripercussioni significative (Patterson, 1995). E' verosimile che con l'aumento delle temperature saranno favorite in particolare le macroterme, per le quali è prevedibile, oltre a una maggiore precocità nell'emergenza, il prolungamento della fase riproduttiva, soprattutto in quelle specie (come ad esempio le solanacee) che presentano una crescita fisiologicamente indeterminata, attualmente limitata dall'abbassamento termico autunnale (Benvenuti, 2011).

Con l'aumento delle temperature è inoltre prevedibile che si intensifichino i fenomeni di desincronizzazione fra foto- e termoperiodo già osservati in vari ambienti (Peñuelas et al., 2002; Fuhrer, 2003), quali l'aumento della frequenza di fioritura nel corso di autunni miti in specie tendenzialmente longidurne. Questo sfasamento ecologico potrebbe favorire le specie che non necessitano di mutualismo con animali per la disseminazione o l'impollinazione (Benvenuti, 2011).

Possibili implicazioni dell'aumento della temperatura sulla dinamica di emergenza delle infestanti

La previsione della dinamica di emergenza delle infestanti è un argomento da molto tempo oggetto di studio (Stoller e Wax, 1973; Ogg e Dawson, 1984; Bewick et al., 1988; Benech Arnold et al., 1990; Grundy, 2003) perché ritenuta fondamentale per ottimizzare le strategie di lotta. La capacità di prevedere le emergenze infatti può aiutare ad ottimizzare la tempistica degli interventi di controllo delle infestanti, aumentare l'efficacia dei metodi di controllo e ridurre l'uso degli erbicidi attraverso la gestione integrata delle malerbe, combinando cioè pratiche culturali e metodi di controllo biologici, fisici e chimici (Buhler et al., 2000). Ciascuna specie infestante mostra caratteristici flussi di germinazione ed emergenza durante il ciclo colturale. Nella pratica, prevedere le emergenze significa conoscere in ogni momento la percentuale di infestanti già presente in campo, che è quindi possibile controllare con un intervento eseguito oggi, e quante infestanti potrebbero emergere nei giorni successivi. Premette quindi di decidere se sia meglio intervenire oggi o attendere qualche giorno prima di eseguire il trattamento erbicida o il controllo meccanico. Inoltre poiché il momento di emergenza delle malerbe relativamente alla coltura influenza la competizione, prevedere la dinamica delle malerbe significa anche saper meglio valutare la potenziale perdita di resa che può essere provocata dalle diverse coorti di infestanti emerse durante il ciclo colturale (Masin et al., 2011).

I primi modelli previsionali erano basati sul concetto di *Growing Degree Days* (GDD) o tempo termico (Bewick et al., 1988; Satorre et al., 1985). In questi, la dinamica delle emergenze veniva descritta considerando la temperatura come unico fattore in grado di influenzare le fasi di germinazione-emergenza. I modelli più recenti considerano anche il potenziale idrico del suolo come fattore che insieme alla temperatura può regolare l'emergenza e si basano dunque sul concetto di "tempo idrotermico" (Alvarado e Bradford, 2005; Ekeleme et al., 2005; Larsen et al., 2004; Leguizamon et al., 2005; Masin et al., 2005; Masin et al., 2012). Questo ultimo concetto ha permesso un notevole miglioramento della capacità previsionale e ha fornito un metodo sufficientemente robusto per capire come i fattori ambientali interagiscono per determinare una certa dinamica di emergenza nel tempo (Bradford, 2002). Grazie all'uso del tempo idrotermico la previsione delle emergenze ha avuto un impulso importante che ha portato anche allo sviluppo di modelli di utilizzo pratico come ad esempio WEEDCAST (Archer et al., 2001) in USA e AlertInf (Masin et al., 2012) in Italia. Dato che questi modelli sono basati su temperatura e potenziale idrico del suolo, possono essere utilizzati per fare delle previsioni sullo spostamento delle emergenze nel caso di scenari con temperature medie superiori a quella attuale di 1, 2 o più °C come previsto da vari modelli di previsione climatica.

Per effettuare le simulazioni della dinamica di emergenza nei diversi scenari di aumento di temperatura è stato utilizzato il modello AlertInf (Masin et al., 2012), sviluppato presso il dipartimento DAFNAE dell'Università di Padova e disponibile nel sito web dell'ARPA Veneto

(www.arpa.veneto.it). Le simulazioni delle emergenze di sei tra le specie infestanti più diffuse nel mais in Italia sono state ottenute con i dati meteo reali misurati nell'anno 2010 nella stazione meteo dell'ARPA Veneto presso l'Azienda Agraria Sperimentale "Lucio Toniolo" dell'Università di Padova. Volendo esplorare il range di scenari proposti da IPCC (2013) sull'andamento delle temperature sino al 2100, per le stesse specie sono stati simulati scenari che prevedono un aumento della temperatura media di 1, 2 e 5 °C rispetto alla temperatura giornaliera misurata nel 2010. Lo scenario con aumento termico medio di 5 °C è stato scelto come caso peggiore, dato che i modelli riportano un aumento massimo di 4.8 °C nel 2100 (IPCC, 2013). In tutti gli scenari si considera una disponibilità idrica non limitante per la germinazione-emergenza. La preparazione del letto di semina è fissata al 3 aprile, data dalla quale ha inizio l'accumulo di tempo termico. La Figura 6 mostra le dinamiche di emergenza delle diverse specie nei diversi scenari di temperatura. In generale si nota un anticipo delle emergenze all'aumentare della temperatura media.

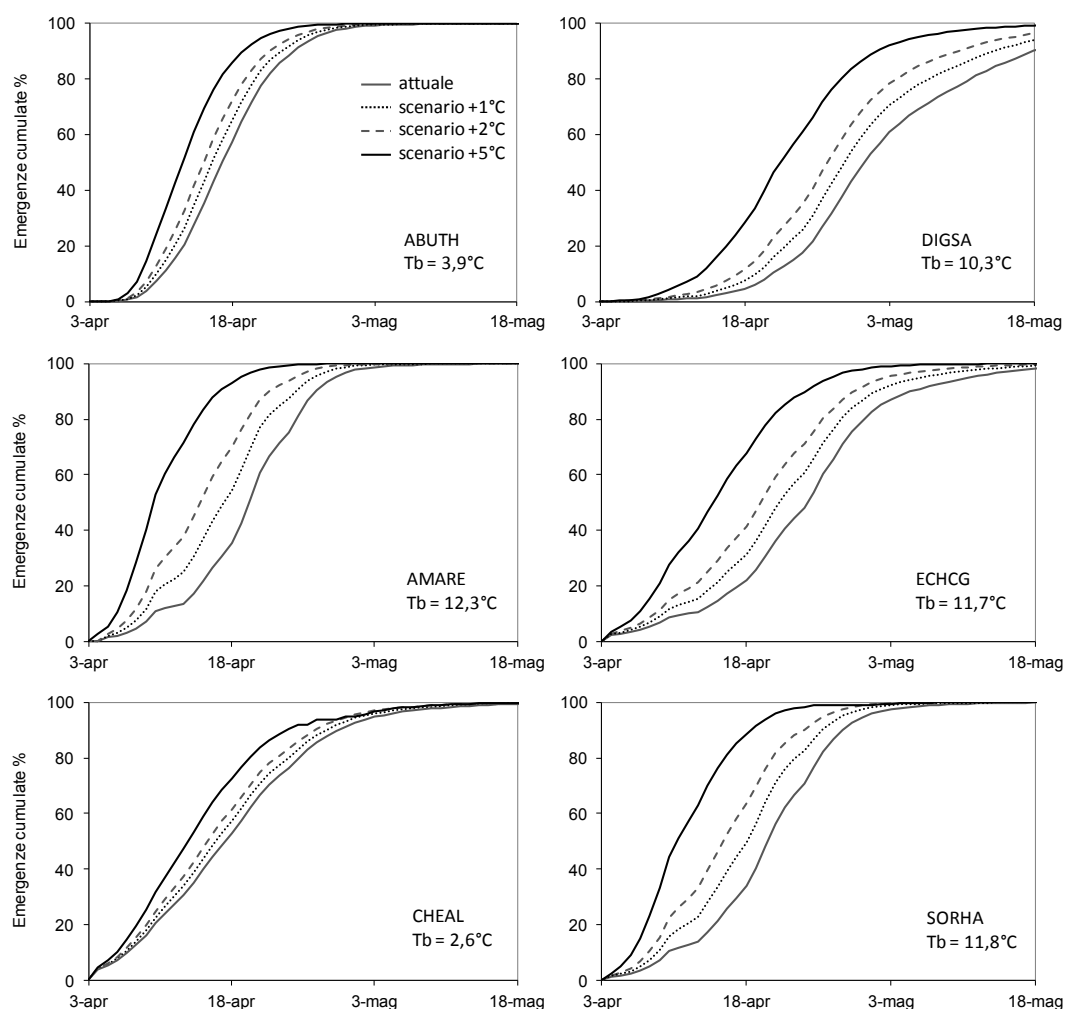


Figura 6. Dinamica di emergenza di sei tra le specie infestanti più diffuse nel mais in Italia in quattro diversi scenari termici (attuale e con temperatura media del periodo accresciuta di 1 °C, di 2 °C e di 5 °C), lo stress idrico non viene considerato. La data di preparazione del letto di semina è il 3 aprile. ABUTH: *Abutilon theophrasti*, DIGSA: *Digitaria sanguinalis*, AMARE: *Amaranthus retroflexus*, ECHCG: *Echinochloa crus-galli*, CHEAL: *Chenopodium album*, SORHA: *Sorghum halepense*.

Osservando la dinamica di emergenza dell'intera infestazione nei diversi scenari (Tabella 3; Figura 7) si nota che il generale anticipo delle emergenze dell'intera infestazione non va a modificare l'intervallo delle date del 50% (linee tratteggiate orizzontali nei grafici) delle emergenze tra le specie più precoci e le più tardive che si riduce di soli 2 giorni tra lo scenario attuale e quello con temperatura media superiore di 5 °C (da 14 a 12 giorni). L'intervallo di date che si riduce di più, passando da uno scenario a temperatura inferiore a uno a temperatura maggiore è quello dell'inizio delle emergenze (5%), che varia da 14 giorni nello scenario attuale a 11 e 10 giorni negli scenari intermedi, fino a 7 giorni in quello +5 °C. Nello scenario più estremo con aumento della temperatura di 5 °C, le infestanti tendono ad iniziare l'emergenza tutte nella stessa settimana, per poi seguire dinamiche con andamenti molto differenti, da molto veloci, con pendenza elevata della curva, a molto lenti, con bassa pendenza, ampliando nuovamente il range delle date in cui le diverse specie raggiungono le varie percentuali. Questa osservazione non è di poco conto se si tiene in considerazione che le malerbe che emergono contemporaneamente alla coltura sono anche quelle più competitive. Avere quindi un anticipo di emergenza e una concentrazione delle prime emergenze delle diverse specie significa avere una forte infestazione nelle fasi iniziali e dunque un'infestazione che può potenzialmente essere più competitiva.

Tabella 3. Date di raggiungimento del 5 (inizio), 50 e 95% (fine) di emergenza delle diverse specie in diversi scenari di aumento di temperatura (temperatura media attuale, incrementata di 1, 2 e 5 °C) ipotizzando il 3 aprile come data di preparazione del letto di semina.

Percentuale di emergenza				Percentuale di emergenza			
ABUTH	5%	50%	95%	DIGSA	5%	50%	95%
attuale	10-Apr	17-Apr	27-Apr	attuale	19-Apr	1-May	23-May
+ 1C	9-Apr	16-Apr	26-Apr	+ 1C	16-Apr	29-Apr	19-May
+ 2C	9-Apr	15-Apr	25-Apr	+ 2C	15-Apr	27-Apr	15-May
+ 5C	8-Apr	13-Apr	21-Apr	+ 5C	11-Apr	22-Apr	6-May
AMARE	5%	50%	95%	ECHCG	5%	50%	95%
attuale	8-Apr	20-Apr	29-Apr	attuale	8-Apr	25-Apr	11-May
+ 1C	7-Apr	18-Apr	27-Apr	+ 1C	7-Apr	22-Apr	6-May
+ 2C	6-Apr	15-Apr	25-Apr	+ 2C	6-Apr	20-Apr	2-May
+ 5C	5-Apr	10-Apr	19-Apr	+ 5C	5-Apr	15-Apr	27-Apr
CHEAL	5%	50%	95%	SORHA	5%	50%	95%
attuale	5-Apr	18-Apr	3-May	attuale	8-Apr	21-Apr	1-May
+ 1C	5-Apr	17-Apr	2-May	+ 1C	7-Apr	18-Apr	28-Apr
+ 2C	5-Apr	16-Apr	30-Apr	+ 2C	7-Apr	16-Apr	26-Apr
+ 5C	4-Apr	14-Apr	30-Apr	+ 5C	5-Apr	11-Apr	21-Apr

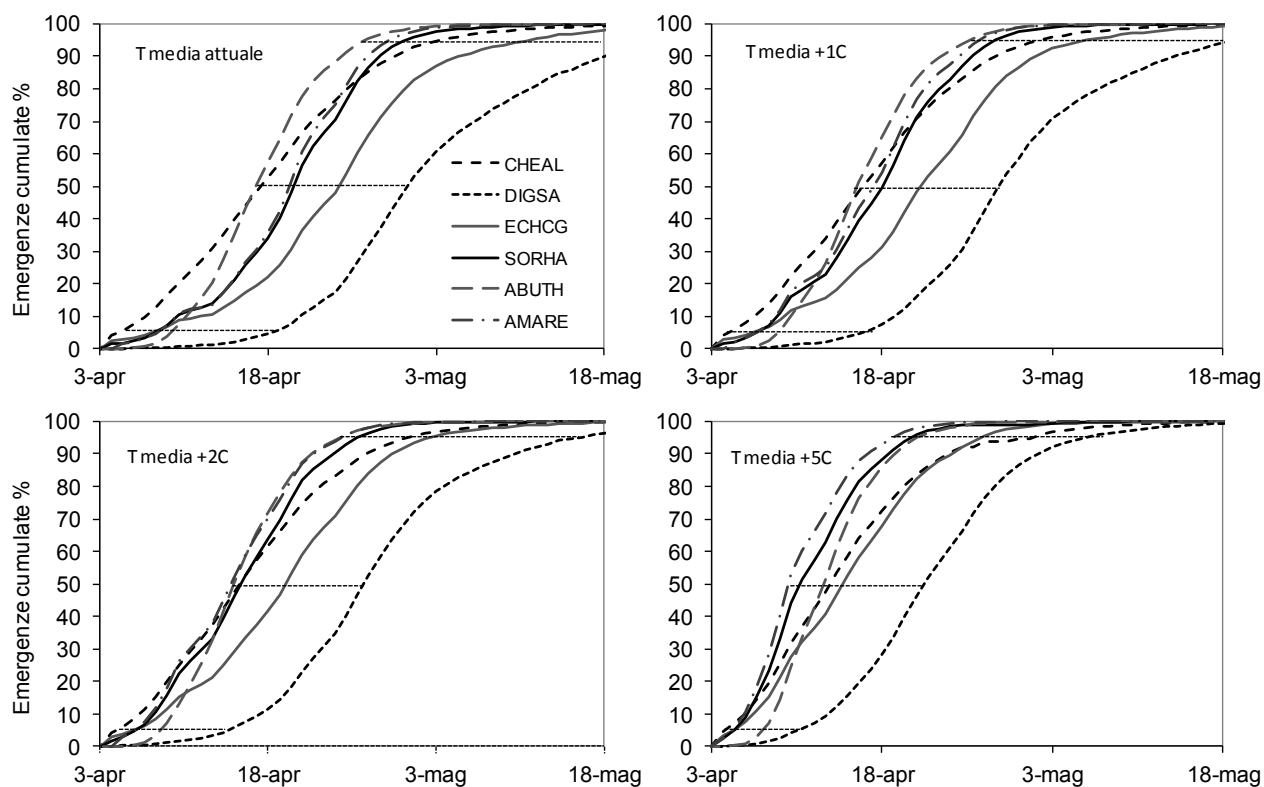


Figura 7. Confronto della dinamica di emergenza delle malerbe in 4 diversi scenari: attuale (T media attuale), con temperatura media incrementata di 1 °C (T media +1 °C), di 2 °C (T media +2 °C) e di 5 °C (T media +5 °C). La data di preparazione del letto di semina è per tutti gli scenari il 3 aprile.

Per un'analisi più completa sarebbe necessario mettere in relazione lo spostamento temporale delle emergenze delle infestanti con lo sviluppo della coltura, anch'esso influenzato dall'aumento delle temperature, che potrebbe annullare il vantaggio competitivo delle infestanti dovuto all'anticipo di emergenza. Altro fattore fondamentale, e non considerato in queste simulazioni, è la disponibilità idrica. Periodi di carenza idrica possono posticipare l'emergenza determinando delle pause seguite da flussi "concentrati" di emergenza in corrispondenza delle piogge. Purtroppo data la difficoltà di prevedere la variazione della distribuzione delle piogge dovuta ai cambiamenti climatici (vedi capitolo successivo), risulta altresì difficile fare delle ipotesi plausibili sulle dinamiche di emergenza.

Effetti delle variazioni degli eventi meteorici

Tra i principali cambiamenti climatici in atto, variazioni relative alle precipitazioni sembrano essere meno evidenti, sebbene vi sia una tendenza all'aumento delle piogge alle latitudini intermedie nell'emisfero boreale e ad un aumento delle regioni nelle quali è aumentata la frequenza degli eventi di maggiore intensità (IPCC, 2013). In tale contesto occorre segnalare il recentissimo studio condotto su 135 stazioni dell'areale euro-mediterraneo per il periodo 1973-2010 (Mariani e Parisi, in corso di stampa) che ha posto in evidenza l'assenza di tendenze significative dell'intensità degli

eventi precipitativi estremi. Tali conclusioni, contrarie a quelle precedentemente ottenute da altri autori (Alpert et al., 2002), trovano conforto nei dati paleoclimatici europei che mostrano che durante la fase fredda della Piccola era glaciale si è registrata una maggiore frequenza di eventi pluviometrici estremi rispetto alla fase calda medioevale (Wainer et al., 2013).

Rispetto alle variazioni di concentrazione di CO₂ e di temperatura, le previsioni sul futuro assetto delle precipitazioni sembrano essere affette da un maggiore grado di incertezza e, soprattutto, risulta molto difficile sviluppare previsioni valide a livello locale (Juroszek e von Tiedemann, 2013).

Tale incertezza costituisce un pesante fattore limitante per la stima delle future dinamiche delle specie infestanti, dal momento che vi è una sostanziale convergenza nel ritenere le condizioni idriche del terreno un fattore determinante nei rapporti competitivi infestanti-coltura e nella distribuzione delle malerbe (Holt e Boose, 2000; Valerio et al., 2011; Stratonovitch et al., 2012; Lovelli et al., 2012; Bourdôt et al., 2013; Valerio et al., 2013). Come visto precedentemente, in alcune specie la disponibilità di acqua fornita dall'irrigazione sarebbe in grado di sopperire ai limiti imposti dal regime termico. In alcune condizioni, tuttavia, come nel caso di *Ambrosia trifida* e *Helianthus annuus*, la dinamica delle popolazioni viene influenzata soprattutto dalla somma termica (Wortman et al., 2012).

Sebbene la disponibilità di acqua sia stata presa in considerazione in vari studi di carattere modellistico che includono previsioni sulla futura distribuzione di diverse specie di malerbe (Wilson et al., 2009; Kriticos et al., 2011), l'analisi degli effetti sulla flora infestante di fattori quali l'umidità del suolo, le diverse variabili climatiche ed i livelli atmosferici di CO₂ costituisce un ambito conoscitivo solo parzialmente indagato e dunque meritevole di approfondimento (Juroszek e von Tiedemann, 2013). Poiché le variazioni di temperatura e di umidità hanno un pesante effetto sulle dinamiche di emergenza, condizionando indirettamente gli effetti competitivi, assumono particolare rilevanza i modelli idrotermici di emergenza basati sulla previsione dell'andamento termo-pluviometrico (Masin et al., 2010; 2012). L'applicazione di tali modelli ha permesso, ad esempio, di evidenziare diverse soglie di potenziale idrico per l'emergenza in ecotipi di *A. retroflexus* provenienti da regioni diverse.

Criticità nella previsione della dinamica evolutiva delle malerbe a seguito dei cambiamenti climatici

Sebbene siano noti alcuni degli effetti che i cambiamenti climatici possono determinare sullo sviluppo delle infestanti, l'evoluzione globale delle comunità di malerbe nel contesto dei cambiamenti climatici in corso è comunque di difficile previsione.

Un primo elemento di incertezza è dovuto alle previsioni della variabilità futura del clima per

quanto concerne in particolare temperatura e precipitazioni, variabilità che viene simulata ricorrendo a modelli fisici basati sulla meccanica newtoniana della continuità, i cosiddetti GCM (*Global Climate Model*). A seconda del GCM adottato le previsioni possono variare sensibilmente, modificando a cascata le stime sulle evoluzioni delle popolazioni infestanti e sulle problematiche malerbologiche che dovranno essere affrontate in futuro. Per rendere l'idea dei livelli di incertezza da cui sono affetti i modelli che operano simulazioni delle temperature globali, in Figura 8 viene presentato il risultato del confronto fra dati osservativi (linea nera) e modelli GCM allo stato dell'arte (bande grigie) (Taylor et al., 2012a). Si osservi che, stante la sostanziale stazionarietà delle temperature globali che si sta manifestando dal 1999, le misure stanno uscendo dalle bande d'inviluppo degli output dei modelli. Si osservi anche che negli anni più recenti i modelli manifestano una palese sovrastima della variabilità interannuale delle temperature globali. Tutto ciò dovrebbe indurre ad un uso assai prudente degli output dei GCM come input di modelli biologici tesi a descrivere il comportamento futuro delle malerbe.

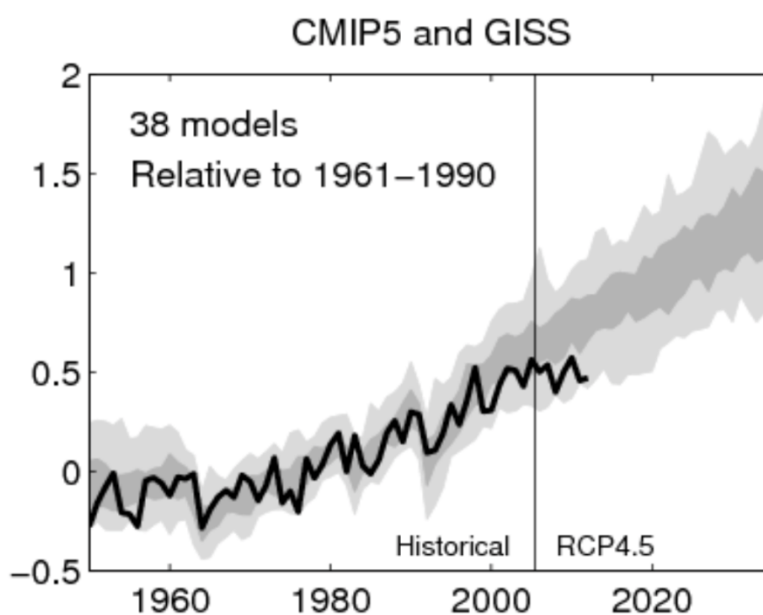


Figura 8. Confronto fra le misure da stazioni al suolo e le simulazioni operate con 38 modelli GCM utilizzati in ambito IPCC. Sull'asse delle ascisse è riportata l'anomalia in °C rispetto alla temperatura media globale 1961-1990. Le bande grigio scuro e grigio chiaro sono rispettivamente le linee d'inviluppo del 50% e del 90% degli output dei GCM considerati. (fonte: Ed Hawkins - University of Reading - www.climate-lab-book.ac.uk/2013/updated-comparison-of-simulations-and-observations/). I dati dei modelli provengono da: WCRP (World Climate Research Programme) - CMIP5 Coupled Model Intercomparison Project (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>). I dati osservativi globali provengono da: GISS - <http://www.giss.nasa.gov>.

Occorre inoltre precisare che una inaccuratezza ancora più rilevante affligge le previsioni delle precipitazioni operate con i GCM (Anagnostopulos et al., 2010) e che l'incertezza viene enfatizzata quando agli output dei GCM si applicano modelli di *downscaling* che dalla macroscale (pixel di

qualche centinaio di km) scendono alla mesoscala (pixel di 50 km o meno).

La fisica del sistema atmosferico, in sostanza una grande macchina termica tenuta in moto dallo squilibrio continuamente imposto dal surplus di energia presente nella fascia intertropicale consente tuttavia di dire che, qualora il “riscaldamento globale” si ripresentasse in un prossimo futuro, subentrando all’attuale fase di stasi, lo scenario più probabile è quello di un maggior trasporto energetico equatore – poli, che si verificherebbe attraverso l’intensificazione della cella di Hadley che governa il tempo atmosferico nella fascia intertropicale e l’intensificazione delle grandi correnti occidentali, che governano il tempo alle medie latitudini. A tale tendenza della circolazione globale dovrebbe conseguire un incremento più sensibile delle temperature alle latitudini medio – alte, in coincidenza con un aumento delle precipitazioni al latitudini di 45-60° e ad una loro diminuzione fra 35 e 45°C (area mediterranea). Nella fascia intertropicale dovremmo invece assistere ad un incremento termico più modesto (Ziska e Beggs, 2012) accompagnato da un significativo incremento delle precipitazioni. Peraltro lo scenario circolatorio sopra delineato porterebbe a tre fenomeni fra loro contrastanti in termini di stimolo agli eventi pluviometrici estremi (Held, 1993): riduzione del gradiente termico superficiale polo-equatore (sfavorevole agli eventi estremi), aumento del gradiente termico in quota polo-equatore (favorevole agli eventi estremi) ed aumento del contenuto in vapore acqueo atmosferico (anch’esso favorevole agli eventi estremi).

Indipendentemente dagli effetti legati alla emissione di CO₂ in atmosfera per il consumo di combustibile fossile, l’attività umana può condizionare pesantemente le dinamiche delle malerbe. L’insieme delle agrotecniche adottate, e in particolare le tecniche di gestione delle malerbe, costituisce una pressione selettiva estremamente importante, che potrebbe in alcuni casi mascherare gli effetti del cambiamento climatico. Un altro elemento che aumenta l’incertezza delle previsioni è l’evoluzione della resistenza agli erbicidi. Questo fenomeno sta interessando un numero sempre maggiore di specie e la comparsa di nuove popolazioni resistenti sta assumendo un andamento quasi esponenziale, con oltre 400 casi attualmente riportati di resistenza a 148 diversi erbicidi a livello mondiale (Heap, 2013). E’ verosimile che la diffusione di questo fenomeno determinerà pesanti ripercussioni sulla gestione delle malerbe, rendendo ulteriormente difficile prevedere quali saranno le dinamiche evolutive. Aspetti di carattere economico, sociale, ambientale e normativo potranno inoltre causare, indipendentemente dal cambiamento climatico, variazioni anche rilevanti negli ordinamenti colturali, nelle modalità di lavorazione del terreno, nella fertilizzazione, nell’irrigazione, nell’adozione delle tecniche di contenimento delle malerbe, nella gestione complessiva dell’agroecosistema, generando una complessa serie di effetti di difficile previsione.

Implicazioni per la lotta

Gli effetti dei cambiamenti climatici sulla biologia ed ecologia delle malerbe, già illustrati in precedenza, comporteranno un impatto anche sulla loro gestione e lotta. In particolare, la lotta chimica, quale principale mezzo di controllo delle malerbe, potrebbe risulterne particolarmente influenzata: i fattori ambientali, quali temperatura, precipitazioni, vento, umidità atmosferica e del terreno, infatti, possono influenzare l'applicazione e l'efficacia degli erbicidi (Pannacci et al., 2010; Brown, 2001).

Per quanto riguarda gli erbicidi di pre-emergenza, la loro efficacia è in larga parte influenzata dalle caratteristiche del terreno. In particolare, una buona umidità del terreno favorisce l'attivazione degli erbicidi residuali migliorandone l'efficacia, mentre elevate temperature associate ad intensa radiazione luminosa e terreni asciutti possono ridurre l'efficacia, aumentando, per alcuni erbicidi, i fenomeni di volatilizzazione e fotodegradazione (Brown, 2008). La degradazione microbica di questi erbicidi è favorita da temperature ed umidità elevate nel terreno che ne riducono di conseguenza la persistenza, mentre condizioni ambientali siccitose possono rallentare la degradazione microbica con aumento della persistenza degli erbicidi residuali (Bailey, 2004). In quest'ottica l'eventuale riduzione della disponibilità idrica dei terreni, accompagnata da una maggior frequenza di periodi siccitosi in primavera-estate, renderebbe i trattamenti di pre-emergenza meno efficaci per le colture primaverili-estive, con aumento della persistenza degli erbicidi e dei possibili rischi di *carry-over* per le colture in successione (Singh et al., 2011). Questi aspetti potrebbero risultare particolarmente rilevanti nei sistemi colturali orticoli, interessati da un significativo impiego di erbicidi residuali in colture a ciclo breve. La tendenza all'instaurarsi di temperature più elevate in autunno-inverno, in presenza di una buona umidità dei terreni, potrebbe invece consentire di mantenere una buona efficacia dei trattamenti di pre-emergenza nelle colture a ciclo autunno-primaverile, riducendone tuttavia la persistenza e la durata dell'attività erbicida, come mostrato da Bailey (2004) con isoproturon. Quest'ultimo aspetto e la tendenza ad una minor efficacia dei trattamenti di pre-emergenza, potrebbero comportare la necessità di dover intervenire con ulteriori trattamenti in post-emergenza.

L'eventuale aumento della frequenza di fenomeni piovosi violenti potrebbe comportare maggiori rischi di fenomeni di ruscellamento e lisciviazione con conseguente aumento dei rischi di inquinamento ambientale da parte degli erbicidi in genere e di quelli residuali in particolare, cui potrebbe associarsi un maggior rischio di fitotossicità nei confronti delle colture (Bloomfield et al., 2006; Jursik et al., 2013).

Per quanto riguarda gli erbicidi di post-emergenza, è noto che buoni livelli termici associati ad una buona disponibilità idrica dei terreni determinino una buona attività metabolica delle malerbe in

condizioni di attiva crescita, favorendo, in tal modo, un buon assorbimento e traslocazione degli erbicidi fogliari con incremento della loro efficacia (Patterson et al., 1999). Condizioni ambientali siccitose possono invece ridurre l'efficacia degli erbicidi ad assorbimento fogliare: le malerbe cresciute in queste condizioni possono presentare cuticole più spesse, modificando la morfologia delle cere epicutcolari e la presenza di tricomi sulle foglie, con il risultato di una riduzione nella ritenzione fogliare, assorbimento e traslocazione dell'erbicida e di conseguenza una riduzione dell'efficacia dei trattamenti (Benvenuti, 2011; Bruce et al., 1996; Ren et al., 2007).

L'aumento della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera, determinando una riduzione della densità stomatica e dell'apertura stomatica media, con conseguente riduzione della traspirazione delle malerbe, potrebbe ridurre l'assorbimento e la traslocazione degli erbicidi sia di pre sia di post-emergenza, limitandone l'efficacia (Patterson et al., 1999; Hayman e Sardras, 2006). In particolare, alcuni studi hanno messo in evidenza come l'aumento dei livelli di CO₂ nell'atmosfera possa determinare una riduzione dell'efficacia di glifosate nei confronti di malerbe annuali e perenni, quali *C. album*, *Elytrigia repens* e *Cirsium arvense* (Archambault, 2007; Ziska, 2003; Ziska e Runion, 2007; Ziska e Teasdale, 2000). In quest'ultima specie, la minor sensibilità a glifosate è risultata correlata all'aumento del rapporto fra biomassa radicale e biomassa epigeica, mostrato in condizioni di crescita in atmosfera arricchita di CO₂; ciò probabilmente a causa dell'effetto "diluizione" dell'erbicida, determinato dalle maggiori dimensioni degli organi di riserva (Ziska et al., 2004b). Il maggior accrescimento degli organi di riserva (rizomi, tuberi, bulbi, ecc.) nelle malerbe perenni potrebbe comportare maggiori difficoltà nel controllo e nella gestione di queste specie in futuro, rendendo determinante l'adozione di strategie integrate che combinino misure di tipo preventivo a misure di controllo vero e proprio (Mahajan et al., 2012). Resta, tuttavia, da stabilire se questo tipo di risposta sia ubiquitaria nelle malerbe perenni (Ziska et al., 2009).

Archambault (2007) ha mostrato come l'incremento della temperatura e della concentrazione di CO₂ in ambiente controllato abbia ridotto l'efficacia di glufosinate-ammonio nei confronti di avena selvatica (*Avena spp.*) (Figura 9).

Gli effetti dei cambiamenti climatici sui rapporti malerbe-erbicidi, fin qui menzionati, potranno, allo stesso modo, interferire con l'accrescimento e lo sviluppo delle colture e di conseguenza sui rapporti colture-erbicidi, con possibili rischi di una riduzione della selettività degli principi attivi e aumento dei fenomeni di fitotossicità colturale (Ziska, 2013a).

I cambiamenti climatici e l'aumento della CO₂ potrebbero, inoltre, interferire nel controllo biologico naturale e nei programmi di lotta biologica alle malerbe. L'efficienza degli agenti per il controllo biologico potrebbe venire alterata dai cambiamenti nella morfologia, fenologia e riproduzione delle malerbe, indotti dagli aumenti di CO₂ nell'atmosfera

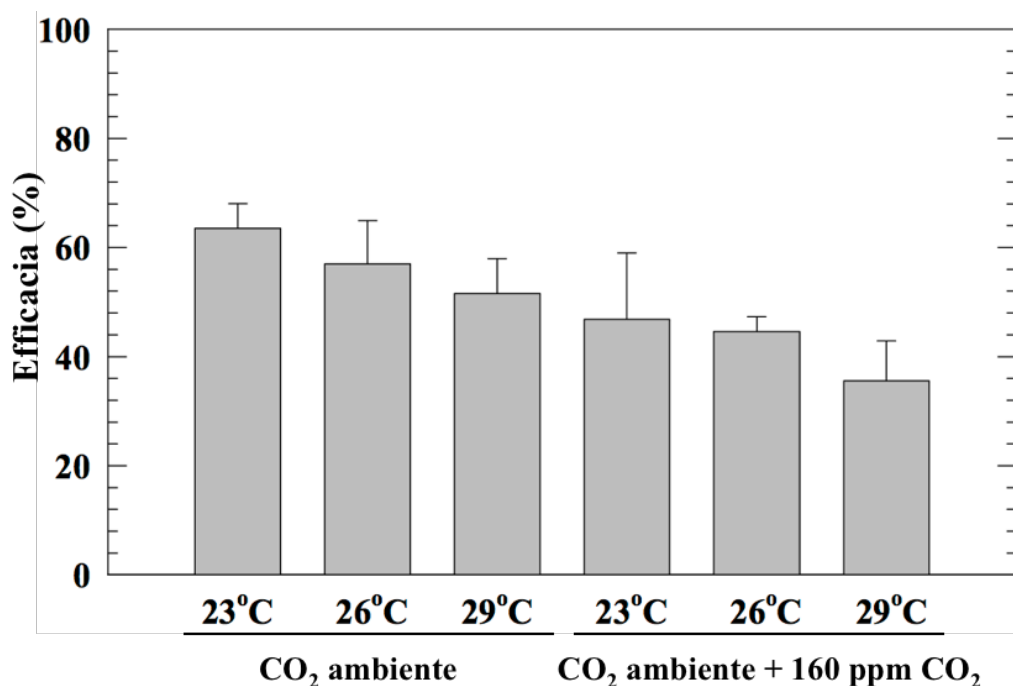


Figura 9. Efficacia di glufosinate ammonio nei confronti di avena selvatica (*Avena spp.*) cresciuta a diversi livelli di temperatura e concentrazione di CO₂ (da Archambault, 2007).

E' dubbio che la sincronia tra lo sviluppo e la riproduzione degli agenti di controllo biologico e delle relative malerbe *target* riesca a perdurare in periodi di rapido cambiamento climatico o condizioni climatiche estreme; se questo poi si tradurrà in un effetto positivo o negativo è ancora poco chiaro (Ziska, 2013a).

La riduzione nell'efficacia del controllo chimico delle malerbe, appare, quindi, tra le principali conseguenze dell'effetto dei cambiamenti climatici. In questo scenario, i sistemi agricoli fortemente dipendenti dall'uso degli erbicidi potrebbero risultare quelli maggiormente in difficoltà nella gestione delle malerbe e tra questi, in particolare, quelli basati sull'uso di colture resistenti o tolleranti agli erbicidi (Singh et al., 2011). Al contrario, l'adozione e lo sviluppo di sistemi di gestione integrata delle malerbe opportunamente adattati in funzione delle diverse aree geografiche e tendenze climatiche prevalenti, appare la strategia migliore per far fronte a possibili cambiamenti della flora infestante, ancora, tuttavia, difficili da prevedere (Juroszek e von Tiedemann, 2013).

In quest'ottica oltre alle ben note misure preventive di gestione delle malerbe (lavorazioni, falsa semina, idonee rotazioni colturali, *cover crops* e razionale uso della fertilizzazione e dell'irrigazione) e di aumento della competitività delle colture (scelta delle colture, delle varietà e dei sistemi di impianto più adatti alle condizioni ambientali di coltivazione) (Liebman e Davis, 2000), un ruolo fondamentale dovrebbe essere svolto dai mezzi diretti di controllo.

A tal proposito, lo sviluppo di nuovi erbicidi con *performances* meno dipendenti dalle condizioni ambientali, l'aggiunta di coadiuvanti (tensioattivi, bagnanti, oli, ecc.) nei trattamenti con erbicidi di

post-emergenza e la scelta dei momenti più opportuni per la loro esecuzione (mattina, sera o notte, in condizioni di temperatura e umidità relativa ottimali), potrebbero rappresentare delle misure di adattamento alle variazioni climatiche al fine di migliorare l'efficacia del controllo chimico (Hayman e Sardras, 2006).

In maniera analoga, nei sistemi colturali irrigui, pur con le dovute limitazioni derivanti dalla ridotta disponibilità d'acqua, l'uso dell'irrigazione potrebbe assumere un ruolo fondamentale anche nel migliorare l'efficacia dei trattamenti erbicidi; ciò in considerazione dell'importanza delle condizioni idriche dei terreni ai fini di una buona efficacia degli erbicidi e dell'incertezza nelle previsioni sul futuro assetto delle precipitazioni, soprattutto a livello locale (Juroszek and von Tiedemann, 2013). Le irrigazioni di "attivazione", da eseguire dopo l'applicazione degli erbicidi di pre-emergenza, l'applicazione di erbicidi mediante l'irrigazione localizzata e la subirrigazione e la scelta di interventi irrigui per limitare condizioni di stress prima di trattamenti erbicidi di post-emergenza, potrebbero rappresentare delle misure rivolte ad aumentare l'efficacia dei trattamenti.

Il controllo meccanico delle malerbe, anche se da alcuni ritenuto potenzialmente meno efficace nei confronti delle malerbe perenni per la loro tendenza ad incrementare le dimensioni degli organi di propagazione vegetativa, potrebbe rappresentare, invece, una valida integrazione all'uso degli erbicidi per il controllo delle malerbe annuali. Le condizioni ambientali prevalentemente asciutte e siccitose, che alcune previsioni sui cambiamenti climatici prospettano, rappresentano spesso le condizioni ideali per il successo in termini di applicabilità ed efficacia dei mezzi meccanici (Lichtenhahn et al., 2005; Van der Weide et al., 2008). In maniera analoga, la pacciamatura e la solarizzazione potrebbero trovare sempre maggiori possibilità di applicazione nel controllo delle malerbe in situazioni ambientali caratterizzate da aumento della temperatura e della radiazione solare.

Conclusioni

L'evoluzione nel tempo delle principali caratteristiche delle variabili climatiche rappresenta uno dei tratti distintivi del clima terrestre. In particolare, nel corso delle ere geologiche e della storia più recente si sono succeduti periodi nei quali la temperatura media ha subito alterni aumenti e diminuzioni. A partire dal 1850 ha avuto inizio una fase di riscaldamento globale, che ha portato ad un aumento complessivo della temperatura di circa 0.7 °C. A questo fenomeno sono associati anche un aumento della concentrazione della CO₂ atmosferica ed un diverso assetto del ciclo idrologico a livello globale. Sebbene non vi sia un definitivo accordo nel mondo scientifico sui rapporti di causa-effetto che legano il riscaldamento globale e l'aumento di CO₂, quest'ultimo viene principalmente

attribuito al consumo di riserve fossili di carbonio da parte dell'uomo, incrementatosi in maniera drammatica a partire dall'inizio dell'era industriale.

In ogni caso, l'evoluzione delle caratteristiche climatiche determina inevitabilmente delle conseguenze di varia entità sulle piante e, più in generale, su tutti gli organismi viventi. Pur in misura minore rispetto ad altre avversità biotiche delle colture agrarie, le piante infestanti sono state oggetto di vari studi che hanno cercato di evidenziare la potenziale risposta ai cambiamenti climatici in termini fisiologici ed ecologici, anche al fine di ottenere previsioni circa le specie che potrebbero vedere accresciuta la loro importanza in futuro per maggiori capacità competitive e riproduttive/moltiplicative o a causa di un ampliamento del loro areale di distribuzione.

Gli studi hanno evidenziato che, sebbene siano spesso osservabili significative alterazioni di varie caratteristiche delle infestanti (epoca di emergenza, biomassa totale e sua allocazione, lunghezza del ciclo, caratteri anatomici, ecc.) a seguito dell'aumento della temperatura e/o della concentrazione di CO₂, i possibili futuri scenari sembrano presentare un basso livello di prevedibilità.

Le cause sono da ricercare sia nella incertezza delle previsioni della variabilità futura del clima, sia nella conoscenza ancora parziale dell'effetto di altre variabili climatiche, ed in particolare di quelle che determinano la disponibilità di acqua per le infestanti.

Analisi modellistiche condotte a livello globale sembrano suggerire che gli effetti del cambiamento climatico sulle piante infestanti siano prevalentemente di tipo indiretto, e conseguenti alle dinamiche (contrazione, espansione, traslazione) che coinvolgono gli areali di coltivazione delle diverse specie agrarie. Considerati i numerosi fattori che entrano in gioco nella scelta delle strategie di gestione delle infestanti, quali la presenza di resistenze, la convenienza economica, i vincoli legislativi, l'effettivo peso assunto dal cambiamento climatico nel condizionare l'evoluzione della flora infestante risulta pertanto di difficile valutazione.

È inoltre verosimile che i cambiamenti climatici si tradurranno nella necessità di rivedere in parte le strategie di gestione attualmente adottate, anche in conseguenza dei probabili effetti sul livello medio di efficacia degli erbicidi, sulla loro persistenza e sul loro destino ambientale.

In questo quadro, risulta quanto mai favorito un approccio gestionale basato su strategie di tipo integrato, modulate in funzione dell'area geografica e del cambiamento climatico prevalente. Quello che appare certo è, tuttavia, la necessità di incrementare le conoscenze sulla biologia ed ecologia delle malerbe nel contesto dei cambiamenti climatici in corso, al fine di poterle utilizzare nel ridefinire e/o adattare le strategie integrate di gestione, introducendovi nuove tecnologie e sistemi di supporto alle decisioni, con l'obiettivo di ottimizzare la gestione delle malerbe salvaguardando l'ambiente e le produzioni agricole.

Bibliografia

- Alpert P, Ben-Gai T, Baharad A, Benjamini Y, Yekutieli D, Colacino M, Diodato L, Ramis C, Homar V, Romero R, Michaelides S, Manes A (2002). The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophysical Research Letters* 29: 31-1—31-4.
- Alvarado V, Bradford K (2005). Hydrothermal time analysis of seed dormancy in true (botanical) potato seeds. *Seed Science Research* 15: 77-88.
- Anagnostopoulos GG, Koutsoyiannis D, Christofides A, Mamssis N (2010). A comparison of local and aggregated climate model outputs with observed data. *Hydrological Sciences Journal* 55: 1094–1110.
- Araus JL, Slafer GA, Buxó R, Romagosa I (2003). Productivity in prehistoric agriculture: physiological models for the quantification of cereal yields as an alternative to traditional approaches. *Journal of Archaeological Science* 30: 681–693.
- Archambault DJ (2007). Efficacy of herbicides under elevated temperature and CO₂. In: Newton PCD, Carran RA, Edwards GR, Niklaus PA (Eds) *Agroecosystems in a Changing Climate*. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 333–336.
- Archer DW, Forcella F, Eklund JJ, Gunsolus J (2001). WeedCast Version 2.0. www.morris.ars.usda.gov
- Bailey SW (2004). Climate change and decreasing herbicide persistence. *Pest Management Science* 60: 158–162.
- Beerling DJ, Osborne CP, Chaloner WG (2001). Evolution of leaf-form in land plants linked to atmospheric CO₂ decline in the Late Palaeozoic era. *Nature* 410: 352–354.
- Benech Arnold RL, Ghera CM, Sanchez RA, Insausti P (1990). A mathematical model to predict Sorghum halepense (L.) Pers seedling emergence in relation to soil temperature. *Weed Research* 30: 91-99.
- Benvenuti S (2011). Potenziale impatto dei cambiamenti climatici nell'evoluzione floristica di fitocenosi spontanee in agroecosistemi mediterranei. *Italian Journal of Agronomy* 4: 45–68.
- Bewick TA, Binming LK, Yandell B (1988). A degree-day model for predicting the emergence of swamp dodder in cranberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 113: 839-841.
- Bloomfield JP, Williams RJ, Gooddy DC, Cape JN, Guha P (2006). Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater - a UK perspective. *Science of the Total Environment* 369: 163–177.
- Bourdôt GW, Lamoureaux SL, Watt MS, Kriticos DJ (2013). The potential global distribution of tall buttercup (*Ranunculus acris* ssp. *acris*): opposing effects of irrigation and climate change. *Weed Science* 61: 230–238.
- Bradford KJ (2002). Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science* 50: 248-260.
- Brown K (2001). Environmental Impact on Herbicide Performance. In.: *Proceedings of 2nd Annual Manitoba Agronomists Conference*. University of Manitoba Winnipeg, Manitoba. pp 155–158. Disponibile on line: http://www.umanitoba.ca/faculties/afs/MAC_proceedings/2001/pdf/brown.pdf.
- Brown SM (2008). Drought impact on weed management. *Extension Bulletin. University of Georgia, College of Agricultural and Environmental Sciences Cooperative Extension*. Disponibile on line: [http://www.caes.uga.edu/topics/disasters/drought/commodities/weed management](http://www.caes.uga.edu/topics/disasters/drought/commodities/weed%20management).

- Bruce JA, Carey JB, Penner D, Kells JJ (1996). Effect of growth stage and environmental on foliar absorption, traslocation, metabolism and activity of nicosulfuron in quackgrass (*Elytrigia repens*). *Weed Science* 44: 447-454.
- Buhler DD, Liebman M, Obrycki JJ (2000). Theoretical and practice challenges to an IPM approach to weed management. *Weed Science* 48: 274-278.
- Ceccarelli S, Grando S, Maatougui M, Michael M, Slash M, Haghparsat R, Rahmanian A, Taheri A, Al-Yassin A, Benbelkacem A, Labdi M, Mimoun H, Nachit M (2010). Plant breeding and climate changes. *Journal of Agricultural Science* 148: 627–637.
- Chown SL, Roux PC le, Ramaswila T, Kalwij JM, Shaw JD, McGeoch MA (2013). Climate change and elevational diversity capacity: do weedy species take up the slack? *Biology Letters* 9: 20120806.
- Clements DR, DiTommaso A (2011). Climate change and weed adaptation: can evolution of invasive plants lead to greater range expansion than forecasted? *Weed Research* 51: 227–240.
- Clements DR, DiTommaso A (2012). Predicting weed invasion in Canada under climate change: Evaluating evolutionary potential. *Canadian Journal of Plant Science* 92: 1013–1020.
- Conti G, Fagarazzi L (2005). Avanzamento del bosco in ecosistemi montani: sogno degli ambientalisti o incubo per la società? Cause, aspetti ed impatti di una delle principali trasformazioni ambientali, territoriali e paesistiche del XX secolo in Italia. *PLANUM: The European on line- journal of planning* 11: 1-20.
- Drake BG, González-Meler MA, Long SP (1997). More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 48: 609–639.
- Ehleringer JR, Monson RK (1993). Evolutionary and ecological aspects of photosynthetic pathway variation. *Annual Review of Ecology and Systematics* 24: 411–439.
- Ekeleme F, Forcella F, Archer DW, Akobundu IO, Chikoye D (2005). Seedling emergence model for tropic *Ageratum conyzoides*. *Weed Science* 53: 55-61.
- European Commission, (2007). Adapting to Climate Change in Europe – Options for EU Action. Green Paper from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM(2007)354 final, SEC(2007) 849. European Commission, Brussels. Disponibile on line: http://www.eurlex.europa.eu/LexUriServ/site/en/com/2007/com2007_0354en01.pdf.
- Ferrero A, Vidotto F (2006). Inerbimenti del mais e loro rapporti con alcuni parametri pedoclimatici. In *Caratteristiche agronomiche, economiche e ambientali dei diserbanti del mais: il caso di studio della terbutilazina*. Cooperativa Terremerse Soc. Coop, Bagnacavallo (RA), Italy, pp 3-13.
- Fuhrer J (2003). Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 97: 1–20.
- Grundy AC (2003). Predicting weed emergence: a review of approaches and future challenges. *Weed Research* 43: 1-11.
- Hayman PT, Sardras VO (2006). Climate change and weed management in Australian Farming Systems. In *Proceedings of: 15th Australian Weeds Conference. Managing weeds in a Changing Climate*, pp. 22-26. Disponibile on line: <http://www.caws.org.au/awc/2006/awc200610221.pdf>.
- Heap I (2013). The International Survey of Herbicide Resistant Weeds. <http://www.weedscience.com/summary/home.aspx>. Accessed 5 Dec 2013
- Held IM (1993). Large-scale dynamics and global warming. *Bulletin of American Meteorological Society* 74: 228–241.

- Holt JS, Boose AB (2000). Potential for spread of *Abutilon theophrasti* in California. *Weed Science* 48: 43–52.
- Hoyle GL, Venn SE, Steadman KJ, Good RB, McAuliffe EJ, Williams ER, and Nicotra AB (2013). Soil warming increases plant species richness but decreases germination from the alpine soil seed bank. *Global Change Biology* 19: 1549–1561.
- Hyvönen T (2008). Impact of temperature and germination time on the success of a C₄ weed in a C₃ crop: *Amaranthus retroflexus* and spring barley. *Agricultural and Food Science* 20: 183–189.
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Disponible presso http://www.climate2013.org/images/uploads/WGI_AR5_SPM_brochure.pdf.
- IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Juroszek P, von Tiedemann A (2013). Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: a review of approaches, challenges, research gaps, key studies and concepts. *Journal of Agricultural Science* 151:1 63–188.
- Jursík M, Kočárek M, Hamouzová K, Soukup J, Venclová V (2013). Effect of precipitation on the dissipation, efficacy and selectivity of three chloroacetamide herbicides in sunflower. *Plant, Soil and Environment* 59: 175-182.
- Kirkby et al. (2011). Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation. *Nature* 476: 429–433.
- Kriticos DJ, Watt MS, Potter KJB, Manning LK, Alexander NS, Tallent-Halsell N (2011). Managing invasive weeds under climate change: considering the current and potential future distribution of *Buddleja davidii*. *Weed Research* 51: 85–96.
- Lacis AA, Schmidt GA, Rind D, Ruedy RA (2010). Atmospheric CO₂: principal control knob governing earth's. *Science* 330: 356-359.
- Larsen SU, Bailly C, Come D, Corbineau F (2004). Use of hydrothermal time model to analyse interacting effects of water and temperature on germination of three grass species. *Seed Science Research* 14: 35-50.
- Leguizamon ES, Fernandez-Quintanilla C, Barroso J, Gonzalez-Andujar JL (2005). Using thermal and hydrothermal time to model seedling emergence of *Avena sterilis* ssp. *ludoviciana* in Spain. *Weed Research* 45: 149-156.
- Lichtenhahn M, Koller M, Dierauer H, Baumann D (2005). Weed control in organic vegetable cultivation. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Frick, Switzerland, pp. 12. Disponible on line (09/12/2013): http://www.organiccentre.ca/Docs/FiBL_WeedCtrl_Vegetables.pdf.
- Liebman M, Davis AS (2000). Integration of soil, crop and weed management in low-external-input farming systems. *Weed Research* 40: 27-47.
- Lovelli S, Perniola M, Scalcione E, Troccoli A, Ziska LH (2012). Future climate change in the Mediterranean area: implications for water use and weed management. *Ital Journal of Agronomy* 7:e7 44-49.
- Maggiore T, Mariani L (2013). Clima europeo, cambiamento climatico e ideotipi di frumento, In atti di AISTEC 2013, 3-7.
- Mahajan G, Singh S, Chauhan BS (2012). Impact of climate change on weeds in the rice-wheat cropping system. *Current Science (Bangalore)* 102: 1254–1255.

- Mariani L (2012)a. Il fattore forzante della CO₂. In Pedrocchi E, Alimonti G. (a cura di) *Energia, Sviluppo, Ambiente*, Progetto Leonardo, Esculapio scuola, Bologna, pp 323-329.
- Mariani L (2012)b. Una determinante fonte per nutrire il mondo: CO₂, agricoltura e governo del ciclo del carbonio. *Acta Museorum Italicorum Agriculturae* 23-24: 12-22.
- Mariani L, Parisi S, (in corso di stampa). Extreme rainfalls in the Mediterranean area. In Diodato N, Bellocchi G, Romano N (Eds) *Advances in Natural and Technological Hazards*, Springer Book 309733.
- Mariani L, Parisi SG, Cola G, Failla O (2012). Climate change in Europe and effects on thermal resources for crops. *International Journal of Biometeorology* 56: 1123–1134.
- Marini L, Battisti A, Bona E, Federici G, Martini F, Pautasso M, Hulme PE (2012). Alien and native plant life-forms respond differently to human and climate pressures. *Global Ecology and Biogeography* 21: 534–544.
- Masin R, Loddo D, Benvenuti S, Stefan O, Zanin G (2012). Modeling weed emergence in Italian maize fields. *Weed Science* 60: 254–259.
- Masin R, Loddo D, Benvenuti S, Zuin MC, Macchia M, Zanin G (2010). Temperature and water potential as parameters for modeling weed emergence in Central-Northern Italy. *Weed Science* 58: 216–222.
- Masin R, Vasileadis VP, Loddo D, Otto S, Zanin G (2011) A single time survey method to predict the daily weed density for weed control decision-making. *Weed Science* 59: 270-275.
- Masin R, Zuin MC, Archer DW, Forcella F, Zanin G (2005). Weedturf: A predictive model to aid control of annual weeds in turf. *Weed Science* 53: 193-201.
- McDonald A, Riha S, DiTommaso A, DeGaetano A (2009). Climate change and the geography of weed damage: Analysis of U.S. maize systems suggests the potential for significant range transformations. *Agriculture Ecosystems & Environment* 130: 131–140.
- Miraglia M, Marvin HJP, Kleter GA, Battilan P, Brera C, Coni E, Cubadda F, Croci L, De Santis B, Dekkers S, Filippi R, Hutjes RWA, Noordman MY, Pisante M, Piva G, Prandini A, Toti L, van den Born GJ, Vespermann A (2009). Climate change and food safety: an emerging issue with special focus on Europe. *Food and Chemical Toxicology* 47: 1009–1021.
- Ogg AGJr, Dawson JH (1984). Time of emergence of eight weed species. *Weed Science* 32: 327-335.
- Olesen JE, Bindi M (2002). Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* 16: 239–262.
- Pannacci E, Mathiassen SK, Kudsk P (2010). The effect of adjuvants on the rainfastness and performance of tribenuron-methyl on broadleaf weeds. *Weed Biology and Management* 10: 126-131.
- Patterson DT (1995). Weeds in a changing climate. *Weed Science* 43: 685–701.
- Patterson DT, Westbrook JK, Joyce RJV, Lingren PD e Rogasik J (1999). Weeds, insects and diseases. *Climatic Change* 43: 711-727.
- Peñuelas J, Filella I, Comas P (2002). Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Glob Change Biology* 8: 531–544.
- Ren L, Wang S, Tian X, Han Z, Yan L, Qiu Z (2007). Non-smooth morphologies of typical plant leaf surfaces and their anti-adhesion affects. *Journal of Bionic Engineering* 4: 33-40.

- Rogers CA, Wayne PM, Macklin EA, Muilenberg ML, Wagner CJ, Epstein PR, Bazzaz FA (2006). Interaction of the onset of spring and elevated atmospheric CO₂ on ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) pollen production. *Environmental Health Perspectives* 114: 865–869.
- Satorre EH, Ghera CM, Pataro AM (1985). Prediction of *Sorghum halepense* (L.) Pers. rhizome sprout emergence in relation to air temperature. *Weed Research* 25: 103–109.
- Satrapová J, Hyvönen T, Venclová V, Soukup J (2013). Growth and reproductive characteristics of C₄ weeds under climatic conditions of the Czech Republic. *Plant, Soil and Environment* 59: 309–315.
- Scafetta N (2012). Testing an astronomically based decadal-scale empirical harmonic climate model versus the IPCC (2007) general circulation climate models. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 80: 124–137.
- Singh RP, Singh RK, Singh MK (2011). Impact of climate and carbon dioxide change on weeds and their management-a review. *Indian Journal of Weed Science* 43: 1–11.
- Stoller EW, Wax LM (1973). Periodicity of germination and emergence of some annual weeds. *Weed Science* 21: 574–580.
- Stratonovitch P, Storkey J, Semenov MA (2012). A process-based approach to modelling impacts of climate change on the damage niche of an agricultural weed. *Global Change Biology* 18: 2071–2080.
- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93: 485–498.
- Taylor S, Kumar L, Reid N (2012). Impacts of climate change and land-use on the potential distribution of an invasive weed: a case study of *Lantana camara* in Australia. *Weed Research* 52: 391–401.
- Valerio M, Lovelli S, Perniola M, Di Tommaso T, Ziska LH (2013). The role of water availability on weed–crop interactions in processing tomato for southern Italy. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 63: 62–68.
- Valerio M, Tomecek MB, Lovelli S, Ziska LH (2011). Quantifying the effect of drought on carbon dioxide-induced changes in competition between a C₃ crop (tomato) and a C₄ weed (*Amaranthus retroflexus*). *Weed Research* 51: 591–600.
- Van der Weide RY, Bleeker PO, Achten VTJM, Lotz LAP, Fogelberg F, Melander B (2008). Innovation in mechanical weed control in crop rows. *Weed Research* 48: 215–224.
- Vidotto F, Fogliatto S, Ferrero A (2013). Interactions between summer weed communities and pedo-climatic characteristics in Italian maize fields. In *Proceedings of the 16th EWRS Symposium*, Samsun, Turkey, pp 123–123.
- Wainer K, Genty D, Blamart D, Bar-Matthews M, Quinif Y, Plagnes V (2013). Millennial climatic instability during penultimate glacial period recorded in a south-western France speleothem. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 376: 122–131.
- Williams AL, Wills KE, Janes JK, Vander Schoor JK, Newton PCD, Hovenden MJ (2007). Warming and free-air CO₂ enrichment alter demographics in four co-occurring grassland species. *New Phytologist* 176: 365–374.
- Wilson PD, Downey PO, Leishman M, Gallagher R, Hughes L, O'Donnell J (2009). Weeds in a warmer world: predicting the impact of climate change on Australia's alien plant species using MaxEnt. *Plant Protection Quarterly* 24: 84–87.

- Wortman SE, Davis AS, Schutte BJ, Lindquist L, Cardina J, Felix J, Sprague CL, Dille JA, Ramirez AHM, Reicks G, Clay SA (2012). Local conditions, not regional gradients, drive demographic variation of giant ragweed (*Ambrosia trifida*) and common sunflower (*Helianthus annuus*) across Northern U.S. maize belt. *Weed Science* 60: 440–450.
- Ziska LH (2000) The impact of elevated CO₂ on yield loss from a C₃ and C₄ weed in field-grown soybean. *Global Change Biology* 6: 899–905.
- Ziska LH (2003). Evaluation of the growth response of six invasive species to past, present and future carbon dioxide concentrations. *Journal of Experimental Botany* 54: 395–404.
- Ziska LH (2003). Evaluation of yield loss in field sorghum from a C₃ and C₄ weed with increasing CO₂. *Weed Science* 51: 914–918.
- Ziska LH (2013)a. Climate Change Impacts on Weeds. Climate Change and Agriculture: Promoting Practical and Profitable Responses, III2-III5, Disponibile on-line: <http://www.climateandfarming.org/pdfs/FactSheets/III.1Weeds.pdf>
- Ziska LH (2013)b. Observed changes in soyabean growth and seed yield from *Abutilon theophrasti* competition as a function of carbon dioxide concentration. *Weed Research* 53: 140–145.
- Ziska LH, Beggs PJ (2012). Anthropogenic climate change and allergen exposure: The role of plant biology. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 129: 27–32.
- Ziska LH, Bunce J, Goins E (2004)a. Characterization of an urban-rural CO₂/temperature gradient and associated changes in initial plant productivity during secondary succession. *Oecologia* 139: 454–458.
- Ziska LH, Epstein PR, Schlesinger WH, (2009). Rising CO₂, Climate Change, and Public Health: Exploring the Links to Plant Biology. *Environmental Health Perspectives* 117: 155–158.
- Ziska LH, Faulkner S, Lydon J (2004)b. Changes in biomass and root:shoot ratio of field-grown Canada thistle (*Cirsium arvense*), a noxious, invasive weed, with elevated CO₂: implications for control with glyphosate. *Weed Science* 52: 584–588.
- Ziska LH, Gebhard DE, Frenz DA, Faulkner S, Singer BD, Straka JG (2003). Cities as harbingers of climate change: Common ragweed, urbanization, and public health. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 111: 290–295.
- Ziska LH, Runion GB (2007). Future weed, pest and disease problems for plants. In Newton PCD, Carran A, Edwards GR, Niklaus PA (Eds) *Agroecosystems in a Changing Climate*. CRC Press, Boston, MA. pp. 262–279.
- Ziska LH, Teasdale JR (2000). Sustained growth and increased tolerance to glyphosate observed in a C₃ perennial weed, quackgrass (*Elytrigia repens*), grown at elevated carbon dioxide. *Australian Journal of Plant Physiology* 27: 159–66.